تحلیل اثر نسبت طول به قطر و فاصله شمع‌ها در گروه شمع بر توابع امپدانس و انتقال در یک مدل مربوط به اندرکنش خاک- شمع- سازه*

احمدرضا محبوبی [۱] کامران پناغی [۲]

چکیده در گذشته تحلیل لرزه‌ای سازه‌ها، با توجه به اثر خاک زیرین در افزایش میرایی و زمان تناوب حرکت سازه نسبت به تکیه‌گاه صلب، با چشم‌پوشی از اندرکنش خاک با پی و اعمال حرکت لرزه‌ای به تکیه‌گاه سازه در سطح زمین صورت می‌گرفت. با این حال، بزرگ‌نمایی حرکت سیستم در برخی موارد موجب تردید در فرض محافظه‌کارانه بودن این رویکرد گردید. هدف مطالعه‌ی حاضر بررسی اثر پارامترهای نسبت طول به قطر و فاصله به قطر شمع‌ها در گروه‌های شمع ۲×۲ و ۳×۳ است. افزایش نسبت‌های طول و فاصله به قطر شمع‌ها منجر به افزایش مقدار توابع انتقال در اندرکنش سینماتیک می‌گردد. این اثرات در اندرکنش وابسته به اینرسی به‌صورت کاهش قسمت حقیقی تابع امپدانس و افزایش قسمت مجازی آن خود را نشان می‌دهند.

واژه‌های کلیدی اندرکنش سینماتیک، اندرکنش وابسته به اینرسی، پی‌های شمعی، تابع انتقال، تابع امپدانس.

The Effects of Piles Spacing and Length to Diameter Ratios on the Soil-Pile-Structure Interaction Phenomenon

A. Mahboubi K. Panaghi

Abstract *The seismic analysis of structures in the past relied on the assumed soil desirable effects as the elongation of excitation period with higher damping. Therefore, imposing earthquake loading at the foundation level fulfilling higher safety requirements was the common practice until occasional movement amplifications demanded more rigorous research. The goal of the current study is to scrutinize the effects of length to diameter and spacing to diameter ratios on the response of soil-pile group-structure systems of 2x2 and 3x3 arrangements. The mentioned parameters' increase in the kinematic interaction study resulted in higher transfer functions. Such changes lead to decrease in the real part and increase in the imaginary part of the impedance functions in the inertial interaction study.*

Key Words Kinematic Interaction, Inertial Interaction, Pile Foundation, Transfer Function, Impedance Function.

★تاریخ دریافت مقاله ۸۹/۵/۲۷ و تاریخ پذیرش آن ۹۲/۳/۲۸ می‌باشد.

(۱) نویسنده‌ی مسؤول، دانشیار، گروه ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی تهران.

(۲) دانشجوی دکترای خاک وپی، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس تهران.

مقدمه

یکی از کاربردهای مهم شمع‌ها استفاده از آن‌ها به‌عنوان پی برای سازه‌هایی است که تحت لرزش ماشین‌آلات دوار (پمپ‌های دورانی، توربین‌ها و...) می‌باشند. در این‌گونه سازه‌ها شمع‌ها نه‌تنها موجب افزایش سختی پی می‌گردند، بلکه اندرکنش آن‌ها با خاک اطراف تأثیرات مثبتی بر خصوصیات دینامیکی کل سازه می‌گذارد. علاوه براین، شمع‌ها به‌عنوان پی در سازه‌های بناشده برخاک نرم برای بهبود خواص خاک و نیز انتقال بارهای سازه‌ای به لایه‌های مستحکم تحتانی مورد استفاده قرار می‌گیرند. افزایش مقاومت سازه‌های بلند حساس در برابر بارگذاری جانبی نیز از دیگر موارد کاربرد این‌گونه پی‌ها می‌باشد. مسائل اندرکنشی به‌طورکلی در پدیده‌هایی که در آن‌ها دو جسم دارای سختی متفاوت درکنار یکدیگر قرار می‌گیرند، مطرح می‌شوند. این مسأله در مورد پی‌های شمعی نیز با توجه به این‌که شمع دارای جنس متفاوتی از خاک اطراف می‌باشد، صادق است. درنتیجه این پدیده و پاسخ متفاوت اجسام، توزیع نیروها و لنگرهای متفاوتی در سازه و نیروهایی پیش‌بینی نشده در خاک ایجاد خواهند شد. تغییرمکان‌های حاصل از بارگذاری لرزه‌ای نیز از این قاعده مستثنی نیستند. در گذشته، تحلیل لرزه‌ای سازه‌های دارای پی‌های شمعی بدون درنظر گرفتن اثر اندرکنش سینماتیک خاک- شمع، با اعمال حرکت لرزه‌ای به تکیه‌گاه سازه در سطح زمین صورت می‌پذیرفت. این فرض که به‌دلیل اعمال حرکت ورودی زلزله در سنگ بستر به سازه به‌طور مستقیم محافظه‌کارانه تلقی می‌شد، با انجام تحقیقات بیش‌تر در مورد اندرکنش سینماتیک خاک- شمع و مشاهده‌ی بزرگ‌نمایی حرکت سازه درنتیجه این پدیده، مورد تردید قرار گرفت [1]. مطالعات بیش‌تر در این زمینه بر لزوم بررسی اندرکنش خاک- شمع- سازه به‌عنوان عاملی تعیین‌کننده در طراحی ایمن سازه‌ها صحه گذاشت [2]. علاوه بر این، افزایش بیش از حد زمان تناوب بارگذاری در برخی مواقع، موجب عدم تطابق طیف پاسخ سازه در واقعیت با طیف پاسخ آئین‌نامه‌ای گردید. اثرات جنبشی به‌وسیله‌ی توابع انتقال وابسته به فرکانس که به‌صورت نسبت حرکت پی به حرکت میدان آزاد در غیاب سازه تعریف می‌شوند، مورد بررسی قرار می‌گیرند.

مطالعات انجام‌شده در این حوزه اغلب با استفاده از روش‌های تحلیلی ساده‌شده مانند رویکرد تیر بر بستر ارتجاعی [3-6] و یا روش‌های عددی انجام می‌شوند [7,8]. مدل تیر بر پی وینکلر برای نخستین بار در سال ۱۹۷۰ با موفقیت در تحلیل‌های دینامیکی مورد استفاده قرار گرفت [9]. پس از آن بحث چگونگی رفتار غیرخطی خاک با استفاده از رویکردهای عددی (روش اجزای محدود، روش المان‌های مرزی) مورد بررسی بیش‌تر واقع شد [10,11]. توسعه و تبیین روابط حاکم در روش اجزای مرزی برای بارگذاری لرزه‌ای به‌وسیله‌ی محققان بسیاری صورت گرفته است [12-18]. روش‌های المان مرزی قادر به اثردادن رفتار غیرخطی خاک و یا سطح تماس خاک و شمع نمی‌باشند. با این حال، این روش برای محدوده‌ی وسیعی از مسائل که شامل موج‌های لرزه‌ای متفاوت مانند موج‌های رایلی می‌شوند، مناسب است.

بایستی توجه داشت که مسأله‌ی اندرکنش خاک–سازه–پی مسأله‌ای همبسته می‌باشد که در آن اندرکنش خاک با پی (شمع) بر پاسخ سازه اثر می‌گذارد و پاسخ سازه نیز متقابلاً تغییراتی را بر اندرکنش خاک با پی موجب می‌گردد. این سیکل رفتاری اغلب در بین مهندسان عمران با گرایش‌های زلزله و ژئوتکنیک با رویکردهای تا حدودی متفاوت مورد بررسی قرار می‌گیرد، به‌گونه‌ای که مهندسین زلزله خاک در تماس با پی را به‌صورت فنرهایی با سختی مشخص مدل می‌کنند و برای دربرگرفتن اثرات میرایی نیز از میراگرهایی که با فنرها موازی می‌شوند استفاده می‌کنند و سازه را به‌گونه‌ای واقعی‌تر با در نظرگرفتن نرمی

بیش‌تر آن در مقایسه با جرم متمرکز در نظر می‌گیرنـد. در این رویکرد زمان تناوب طبیعـی سـازه بـه‌صـورت دقیق‌تر بررسی مـی‌شـود و مـدهای ارتعاشـی بـالاتری (به‌صـورت مـؤثر) در تحلیـل‌هـا تحـت پوشـش قـرار می‌گیرند. پیامد این رویکرد آن است کـه رفتـار خـاک به‌صورت غیرواقعی مدل می‌شود و بنابراین حل مزبـور از دیدگاه مهندسان ژئوتکنیک چنـدان منطقـی بـه نظـر نمی‌رسد. این مسأله بـه‌صـورت عکـس بـرای دیـدگاه ژئوتکنیکی قابل طرح است که در آن سازه بـه‌صـورت جرمی متمرکز مدل شده و سعی در مـدل‌سـازی رفتـار خاک به‌گونه‌ای واقعی‌تر می‌باشد. در ایـن مقالـه نیـز از آن‌جا که در بحث اندرکنش وابسته به اینرسی، بایسـتی از اینرسی جـرم سـازه در تحلیـل‌هـا بهـره گرفـت، از جامع‌ترین واژه مـورد اسـتفاده توسـط محققـان یعنـی عنوان «اندرکنش خاک–شمع–سازه» با توجه به نکـات مذکور استفاده شد. در غیاب سازه‌ی اصلی حرکت پـی ممکن است متفاوت از حرکت میدان آزاد باشد. میـدان آزاد معرف منطقه‌ای از خاک است که به اندازه‌ی کافی از پی دور می‌باشد، به‌طوری که پی حرکت میـدان آزاد را از خود متـأثر نمـی‌سـازد. ایـن تفـاوت در نتیجـه‌ی مکانیزم اندرکنش سینماتیک اسـت. اثـرات سـینماتیک به‌وسیله‌ی توابـع انتقـال وابسـته بـه فرکـانس تعریـف می‌شوند. تابع انتقال به‌صورت نسـبت حرکـت پـی بـه حرکت میدان آزاد در غیاب سازه تعریف می‌شود. پـس از تغییر اولیـه در حرکـت لـرزه‌ای زمـین کـه ناشـی از وجود پی در منطقه‌ی مـوردنظر مـی‌باشـد، بایسـتی در تحلیل دقیق مسائل لـرزه‌ای اثـر انـدرکنش کینمـاتیکی شمع و خاک در بارهـای اعمـال‌شـده بـه سـازه و اثـر بارهای اینرسی واردشونده از سازه به پی مورد بررسـی قرار گیرند. ارتعاشات سازه اصلی در نتیجه حرکت پـی (متأثر از اندرکنش سینماتیک) موجب ایجاد نیـروهـای اینرسی سازه‌ای و لنگرهای واژگون‌کننـده در تکیـه‌گـاه سازه می‌شود. در نتیجه‌ی این پدیده، پی و خاک اطراف آن نیروها و تغییرمکان‌های دینامیکی اضافی را متحمـل می‌شوند. این امر به دلیل اندرکنش وابسته بـه اینرسـی است. انعطاف‌پذیری پی به عنوان تکیه‌گاه، شتاب سازه را از خود متأثر می‌سازد. انعطاف‌پـذیری پـی و میرایـی مربوط به اندرکنش خاک– شمع به‌وسیله‌ی تابع وابسته به فرکـانس امپـدانس پـی (امپـدانس دینـامیکی) بیـان می‌شود. مطالعه‌ی پدیده‌ی اندرکنش خاک–شمع–سـازه در حالت کلی و با دقت بالا توسط رویکرد مستقیم کـه در آن کل سیستم مورد نظر به‌صـورت یکپارچـه مـدل شده و اثرات رفتار خمیری نیز در صورت وقـوع قابـل بررسی است، می‌تواند انجام شود. این روش با وجـود مطلوب بودن از نظر دقت نتایج، به‌دلیل هزینه‌ی بـالای زمانی و محاسباتی مقرون بـه صـرفه نبـوده و بنـابراین استفاده از روش‌های جایگزین در بین محققین هنوز از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. در این میان، استفاده از رویکرد بر هـم‌نهـی کـه در آن دو پدیـده‌ی انـدرکنش جنبشی و وابسته به اینرسی به‌صورت جداگانه بررسـی شده ودر خاتمه تلفیق می‌گردند، از محبوبیـت خاصـی برخوردار است. این روش هرچند با فرض رفتار خطی در سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرد، اما به‌طـور کلـی دقت لازم در تحلیل‌های مذکور را به‌دست می‌دهد.

مطالعـات بسـیاری بـرای درک بـه‌تـر اثـر پدیـده اندرکنش خاک– شـمع – سـازه انجـام پذیرفتـه اسـت [1-19]. مطالعه حاضر نیز بر بررسی اثر نسبت طول بـه قطر شمع‌ها و نسبت فاصله‌ی بین شمع‌هـا بـه قطـر در گروه شـمع بـر توابـع امپـدانس و انتقـال در پدیـده‌ی اندرکنش خاک– شـمع– سـازه بـه‌وسـیله‌ی نـرم‌افـزار اجزای محدود ABAQUS 6.8 متمرکز شده اسـت. در این بررسی، خاک به‌صورت یک محیط پیوسته با رفتار غیرخطی محدود که مقدار بار متناظر آن ابتدا برای هـر مدل تحت بارهای مختلف استاتیکی بررسـی و تعیـین گردیده است، در نظر گرفته شـده و شـمع هـای بتنـی دارای رفتار الاستیک خطی با رفتار سر آزاد مـی‌باشـند.

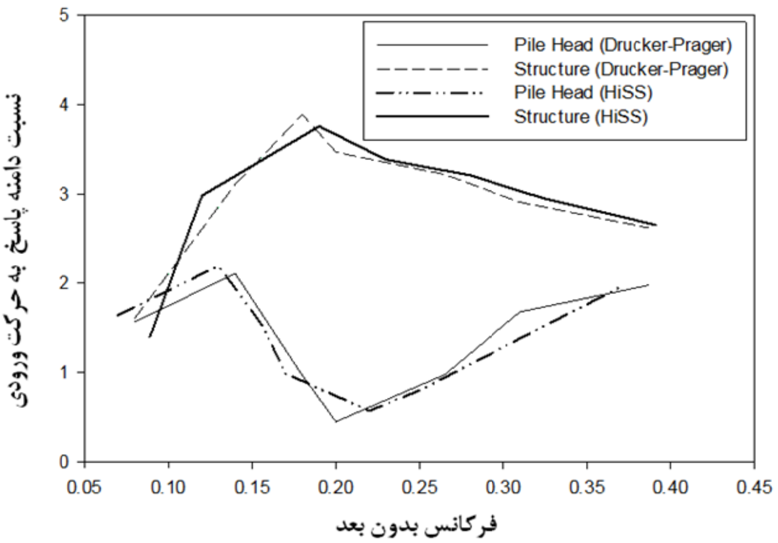
در ضمن جدایش بین خاک و شمع در مدل‌سازی درنظر گرفته شده و شبیه‌سازی مرزهای جانبی به‌صورت نامحدود صورت گرفته است. گروه‌های شمع با آرایش‌های مربعی ۲×۲ و ۳×۳ در خاک ماسه‌ای متراکم قرار گرفته و تحت بارگذاری دینامیکی بررسی شده‌اند.

روند مدل‌سازی

مدل‌سازی عددی مطالعه‌ی حاضر ابتدا برای گروه شمع ۲×۲ مورد صحت سنجی قرار گرفته است. این کار با مقایسه‌ی نتایج حاصل از مدل‌سازی حاضر با مطالعه‌ی Maheshwari et al. (2004) با در نظر داشتن این نکته که مدل رفتاری خاک و نحوه‌ی مدل‌سازی مرزها متفاوت می‌باشند، انجام گردیده است شکل(۱) [11]. هدف Maheshwari et al. (2004) به‌دست آوردن تغییرات نسبت دامنه‌ی پاسخ در سطح زمین به دامنه‌ی حرکت ورودی در سنگ بستر با فرکانس بدون بعد بود. مدل‌سازی مرزها با استفاده از المان‌های کلوین صورت‌گرفته و مدل رفتاری مورد استفاده برای خاک مدل HiSS بوده است. فرکانس بدون بعد به‌صورت نسبت حاصل‌ضرب فرکانس زاویه‌ای و قطر شمع به سرعت موج برشی در محیط تعریف می‌شود. مرزها در مطالعه‌ی حاضر از نوع نامحدود است و مدل رفتاری دراکر-پراگر برای خاک در نظرگرفته شده است. در این مدل‌سازی‌ها شمع‌ها دارای سطح مقطع مربع با بعد ۵۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۰ متراند و فاصله‌ی مرکز به مرکز شمع‌ها ۲/۵ متر می‌باشد. با وجود این تفاوت‌ها در مدل‌سازی، اختلاف جواب‌های به‌دست آمده در حد قابل قبولی می‌باشد.

پس از اعتماد از صحت مدل عددی توسعه داده شده، گستره‌ی خاک در هر امتداد برابر با ۲۰ متر در نظر گرفته شد. گروه‌های شمع مورد بررسی تحت بارگذاری‌های لرزه‌ای تناوبی با فرکانس متفاوت قرار گرفتند. در مطالعه‌ی اثر نسبت طول به قطر شمع بر پدیده‌ی اندرکنش خاک- شمع- سازه، شمع‌ها بتنی و به قطر ۵۰ سانتی‌متر می‌باشند. طول شمع‌ها در حالات مختلف تحلیل برابر با ۸، ۱۰ و ۱۲/۵ متر در نظرگرفته شده‌است و بنابراین نسبت طول به قطرشمع‌ها به‌ترتیب برابر با ١٦، ۲۰ و ۲۵ به‌دست آمد. هم‌چنین نسبت فاصله به قطر شمع‌ها برابر با ۲/۵ در نظر گرفته شد. در مطالعه‌ی اثر نسبت فاصله‌ی بین شمع‌ها به قطر در گروه شمع بر پدیده‌ی اندرکنش خاک- شمع- سازه جنس شمع‌ها از بتن و طول و قطر آن‌ها به‌ترتیب برابر با ۸ و ۰/٤ متر (نسبت طول به قطر برابر با۲۰) درنظرگرفته شد. سه نسبت فاصله به قطر برابر با ۲/۵، ٤ و ٦ برای در نظر گرفتن اثرات تغییر عمل کرد گروهی بر نتایج تحلیل‌ها انتخاب گردیدند. قابل ذکر است که سرشمع‌ها در کلیه‌ی تحلیل‌ها دارای ضخامت ۰/٦ متر و سطح بالایی سرشمع‌ها هم‌سطح با سطح زمین در نظر گرفته شدند. در ادامه، از مطالعه‌ی اثر نسبت طول به قطر شمع بر پدیده‌ی اندرکنش خاک- شمع- سازه به‌عنوان مطالعه‌ی اول و از مطالعه‌ی اثر نسبت فاصله بین شمع‌ها به قطر در گروه شمع بر این پدیده به‌عنوان مطالعه‌ی دوم یاد می‌شود.

مش‌بندی مدل‌ها بایستی به‌گونه‌ای صورت می‌گرفت تا از انعکاس امواج لرزه‌ای به داخل مدل جلوگیری شود. این‌کار مستلزم افزایش اندازه‌ی مدل اجزای محدود با توجه به وجود میرایی در خاک می‌باشد. اما محدودیت موجود از نظر زمان محاسبات، موجب می‌شود تا ایده‌ی استفاده از مرزهای گذرا در کناره‌های مدل مورد توجه قرار گیرد. علاوه بر این، مش اجزای محدود در کناره‌ها درشت و در نزدیکی مدل گروه شمع ریز انتخاب شد. المان‌های مورد استفاده در همه‌ی مدل‌ها از نوع شش‌وجهی هشت‌گرهی انتخاب شدند که در میانه‌های مدل از نوع محدود و در مرزهای جانبی نامحدود بودند.



شکل ۱ مقایسه‌ی نتایج مربوط به صحت‌سنجی مدل حاضر با نتایج حاصل از تحقیق Maheshwari et al. (2004) [11]

جدول ۱ خصوصیات مصالح خاک، شمع وسازه در مطالعه‌ی حاضر

جزء مدل	جنس مصالح	خصوصیات مصالح
خاک	ماسه	$E=80\ MPa,\ \nu=0.35,\ \rho=1900\ kg/m^3,\ \phi=35°,\ \psi=5°$
شمع	بتن	$E=21\ GPa,\ \nu=0.20,\ \rho=2400\ kg/m^3$
سازه	مجازی	$\rho=50000\ kg/m^3$

در همه‌ی تحلیل‌ها جدایش بین شمع و خاک در نظر گرفته شده‌است و قانون اصطکاک کولمب برای مدل کردن سطح تماس شمع‌ها و خاک به‌کار گرفته شد. برای مدل‌سازی سطوح تماس از گزینه‌ی اندرکنش تماسی سطح به سطح استفاده شد که تماس بین سطح شکل‌پذیر (خاک) و سطح صلب (شمع بتنی) را امکان‌پذیر می‌سازد. گره‌های سطح صلب در محاسبات قادر به نفوذ به گره‌های سطح شکل‌پذیر می‌باشند، اما عکس این‌حالت امکان پذیر نیست. پس از معرفی سطوح در تماس با هم و وضعیت آن‌ها نسبت به‌یکدیگر، نحوه‌ی لغزش سطوح بر هم به‌صورت لغزش‌های کوچک تعریف شد. برای تعریف خصوصیات مکانیکی اندرکنش تماسی، الگوریتم تماسی پنالتی که قید کم‌تری نسبت به الگوریتم تماسی سینماتیکی برای گره‌های سطوح در مجاورت یک دیگر ایجاد می‌کند، به کار گرفته شد. رفتار تماسی در جهت نرمال بین سطوح از نوع "سخت" با قابلیت اجازه جدا شدن سطوح چسبیده به‌هم در صورت تجاوز از مقادیر آستانه در نظر گرفته شد.

یک جرم دارای حجم واحد که بار ۵۰۰ کیلو نیوتن را به سرشمع اعمال می‌نمود، برای مدل کردن سازه در مطالعه‌ی مربوط به اندرکنش وابسته به اینرسی درنظر گرفته شد. با توجه به پلاستیسیته‌ی کم به‌وجود آمده در توده‌ی خاک، قانون رفتاری از نوع دراکر- پراگر انتخاب گردید تا نتایج واقع‌گرایانه‌ای به‌دست آید. جدول (۱) خصوصیات مصالح خاک، شمع و سازه‌ی مورد استفاده در این مطالعه را نشان می‌دهد.

شرایط مرزی

مدل‌سازی شرایط مرزی در کناره‌های مدل به‌صورت کاملاً گذرا انجام شد تا از برگشت امواج لرزه ای به داخل مدل و اثر جعبه‌ای جلوگیری شود. این‌کار با استفاده از اجزای نامحدود صورت گرفت. این نوع مرز موج‌های لرزه‌ای منتشر را با فرض رفتار الاستیک خطی محیط مجاور خود به‌طور کامل به بیرون انتقال می‌دهد و از اثرات نامطلوب امواج بازتابی بر نتایج تحلیل عددی جلوگیری می‌کند. در عین‌حال، المان‌های موجود در داخل بدنه‌ی خاک از نوع المان‌های محدود که در آن‌ها انتشار موج سبب ایجاد تنش‌ها و تغییرشکل‌ها و انتقال آن‌ها به المان‌های مجاور می‌گردد، در نظر گرفته شدند. این نوع المان‌ها از نوع شش‌وجهی هشت‌گرهی که در تحلیل‌های ژئوتکنیکی دقت قابل قبولی ارائه می‌دهند، انتخاب گردیدند. در بستر سنگی نیز از المان‌های کلوین برای مدل‌سازی مرزهای نیمه‌گذرا استفاده شد. المان‌های کلوین به دوگونه فنر و میراگر می‌باشند که فنر سختی موجود مربوط به محیط خاکی و میراگرها نیز میرایی محیط را تأمین می‌کنند. شکل (۲) نمونه‌ای از مدل‌های ساخته شده و شرایط مرزی به‌کار گرفته شده در آن‌ها را نشان می‌دهد.

مقادیر ثوابت المان‌های کلوین با استفاده از روش ارائه‌شده به وسیله‌ی Novak and Mitwally به‌صورت ذیل محاسبه می‌شوند [19]:

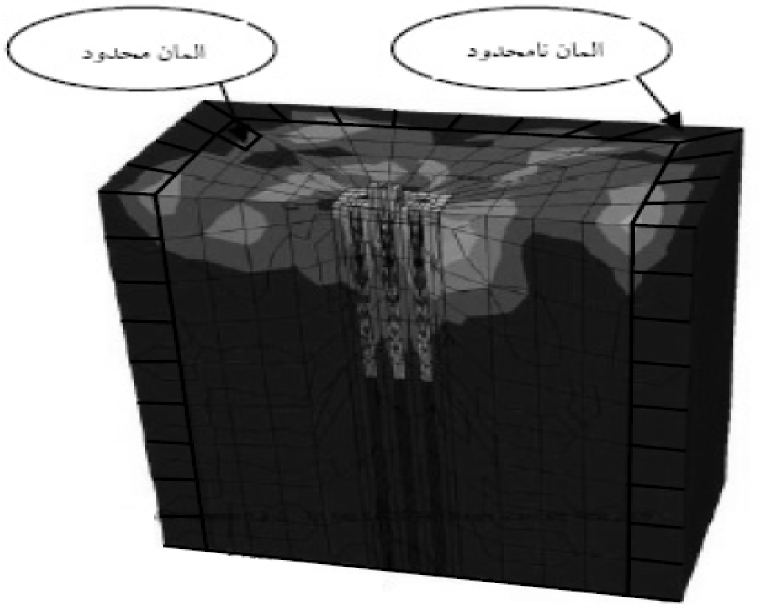
$$k_r^* = \frac{G}{r_0}\left[S_1(a_r, \nu, D) + i S_2(a_r, \nu, D)\right] \qquad (۱)$$

که در آن k_r^* سختی کل، G مدول برشی خاک، r_0 فاصله تا مرز المان محدود، S_1 و S_2 پارامترهای بدون بعد از راه حل های تحلیلی، ν نسبت پواسون، i واحد مجازی $\sqrt{-1}$، a_r فرکانس بی‌بعد برابر با $\frac{r_0\,\omega}{V_S}$ که در آن ω فرکانس زاویه‌ای بارگذاری و V_s سرعت موج برشی در خاک است. قسمت‌های حقیقی و مجازی معادله به‌ترتیب سختی و میرایی را نشان می‌دهند که برابر با:

$$K = \frac{GS_1}{r_0}$$

$$C = \frac{GS_2}{\omega r_0}$$

می‌باشند.



شکل ۲ یک نمونه از مدل خاک- گروه شمع ساخته شده برای تحلیل اندرکنش وابسته به اینرسی

بارگذاری

در کلیه‌ی تحلیل‌های مربوط به مطالعه اول بارگذاری‌های لرزه‌ای تناوبی با فرکانس‌های ارتعاشی ۱/٦، ۵، ۷/۵، ۱۰، ۱۲/۵ و ۱۵ هرتز و با دامنه‌ی بارگذاری ۱۸۰ و ۲٤۰ کیلونیوتن برای گروه شمع چهارتایی (۲×۲) و ۲۸۰ و ۳٦۰ کیلونیوتن برای گروه شمع نه تایی (۳×۳) به سیستم‌ها اعمال گردیدند. با توجه به خصوصیات سیستم‌های مورد بررسی، مقدار فرکانس طبیعی متناظر با مد اول سیستم‌ها در حدود ۱/٦ هرتز بود. از آن‌جا که در تحلیل‌های مربوط به مطالعه دوم، مقدار فرکانس طبیعی متناظر با مد اول سیستم‌ها تقریباً برابر با ۱/٥٦ هرتز به‌دست آمد، بارگذاری‌های لرزه‌ای تناوبی با فرکانس‌های ارتعاشی ۱/۵، ۵، ۷/۵، ۱۰، ۱۲/۵ و ۱۵ هرتز برای مطالعه‌ی دوم درنظر گرفته شدند. در بارگذاری‌های تناوبی اعمال شده، بارگذاری سیستم تا رسیدن سیستم به‌حالت پاسخ یکنواخت ادامه یافت و لذا زمان تحلیل‌ها به تناسب فرکانس بارگذاری به‌گونه‌ای انتخاب شد تا از طرفی تحلیل‌ها از نظر محاسباتی مقرون به‌صرفه باشند و از سویی دیگر از رسیدن به حالت پاسخ یکنواخت در سیستم یقین حاصل شود. در بررسی اندرکنش سینماتیک، بارگذاری‌ها به کف مدل و در اندرکنش وابسته به اینرسی بارگذاری‌ها به سرشمع‌ها اعمال گردیدند. مقادیر خروجی از نرم‌افزار به‌صورت تغییرمکان در سرشمع در هر ۰/۱ ثانیه ثبت شدند.

مقدار تغییرمکان‌های سرشمع ناشی از بارگذاری در بستر (پس از تحلیل‌های مربوط به اندرکنش سینماتیک توسط نرم‌افزار) می‌توانند به‌عنوان ورودی در تحلیل اندرکنش وابسته به اینرسی مورد استفاده قرار گیرند. جدول (۲) مقادیر بارهای انتخابی برای بارگذاری‌های تناوبی را نشان می‌دهد.

مقادیر بارهای وارد به سیستم به گونه‌ای انتخاب شدند تا خاک مورد بررسی در اطراف سرشمع وارد محدوده‌ی رفتار خمیری شود. این کار با تحلیل استاتیکی سیستم خاک- شمع با توجه به بار درنظر گرفته شده و به‌دست آوردن نمودارهای مربوط به کرنش خمیری در خاک با توجه به نمو بار استاتیکی تا کامل شدن آن صورت گرفت.

محاسبه تابع انتقال

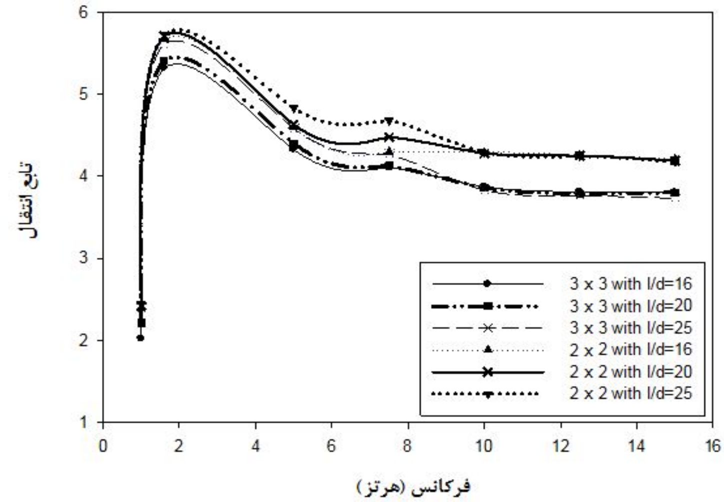
تابع انتقال وابسته به فرکانس مطابق رابطه‌ی شماره (۲) محاسبه می‌شود:

$$TF(f)=\frac{|U_p(f)|}{|U_{ff}(f)|} \tag{۲}$$

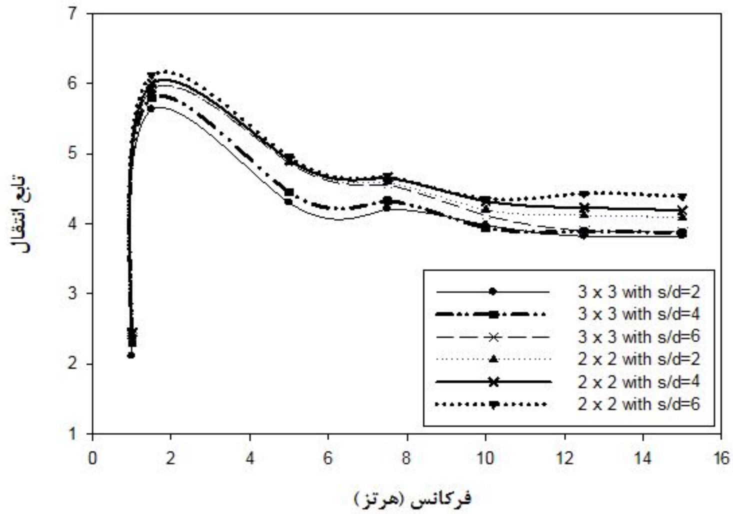
که درآن $|U_p(f)|$ بیش‌ترین پاسخ جانبی در سرشمع و $|U_{ff}(f)|$ پاسخ میدان آزاد در فرکانس ارتعاشی متناظر با آن f می‌باشد. تحلیل‌ها برای بارگذاری‌های ذکرشده در قسمت قبل در هر مورد انجام شدند و نتایج به‌دست آمده مربوط به مطالعات اول و دوم به ترتیب در اشکال (٤ و ۳) ارائه شده‌اند.

جدول ۲ مقادیر بار انتخابی برای بارگذاری‌های تناوبی مورد استفاده در مطالعه‌ی حاضر

نوع تحلیل	بار اعمال شده به هر آرایش گروه شمع برحسب کیلو نیوتن	
	چهارتایی (۲×۲)	**نه تایی (۳×۳)**
اندرکنش سینماتیک	**۱۸۰**	**۲۸۰**
اندرکنش وابسته به اینرسی	**۲٤۰**	**۳٦۰**



شکل ۳ مقایسه‌ی تغییرات تابع انتقال با فرکانس برای گروه‌های شمع ۲×۲ و۳×۳ با توجه به نسبت‌های طول به قطر متفاوت



شکل ٤ مقایسه‌ی تغییرات تابع انتقال بافرکانس برای گروه‌های شمع ۲×۲ و۳×۳ باتوجه به نسبت‌های فاصله به قطر متفاوت

این اشکال نشان می‌دهند که در سیستم‌های دارای سختی کم‌تر یعنی سیستم‌های دارای نسبت طول به قطر بزرگ‌تر و یا نسبت فاصله بین شمع‌ها به قطر بزرگ‌تر، اثر اندرکنش سینماتیک که در قالب توابع انتقال بررسی می‌شود، به‌صورت افزایش مقدار تغییرمکان‌های سرشمع نسبت به سیستم‌های سخت‌تر خود را نشان می‌دهد. این مسأله در فرکانس‌های ارتعاشی بالاتر و نزدیک به فرکانس طبیعی سیستم‌های دارای سختی بیش‌تر، به‌گونه‌ای محدودتر خود را نشان می‌دهد. این نتیجه می‌تواند به ارتعاش بیش‌تر سیستم خاک- شمع در فرکانس‌های بالاتر و نزدیکی رفتار سیستم‌های دارای سختی متفاوت با هم توضیح داده شود. در مطالعه‌ی دوم توابع انتقال به‌دست‌آمده در گروه‌های شمع ۲×۲ به‌طور کلی دارای مقادیر بالاتری نسبت به گروه‌های شمع ۳×۳ می‌باشند. این مسأله می‌تواند به سختی کم‌تر این سیستم‌ها در مقایسه با گروه‌های دارای تعداد شمع بیش‌تر نسبت داده شود. در ضمن افزایش مقدار تابع انتقال در فرکانس حدود ۱/۵ هرتز می‌تواند به اثر تشدید مربوط به نزدیکی فرکانس ارتعاش در این محدوده به فرکانس طبیعی مد اول

سیستم ربط داده شود. در کلیه‌ی تحلیل‌های صورت گرفته مقدار بارگذاری در کف مدل به‌گونه‌ای در سطح آن توزیع شد تا مقدار بار تناوبی موردنظر که به سیستم اعمال می‌شود، حاصل گردد. لازم به ذکر است که مقادیر توابع انتقال به‌دست‌آمده با توجه به نوع بارگذاری لرزه‌ای می‌توانند تغییر نمایند و صرفاً زمان بارگذاری لرزه‌ای در این مورد تعیین‌کننده نیست.

محاسبه تابع امپدانس

تابع امپدانس (IF) یک سیستم خاک- شمع به‌وسیله‌ی سختی و میرایی سیستم معرفی می‌گردد و تابعی از فرکانس ارتعاش (فرکانس تابع بارگذاری) و مقدار نیروی محرک می‌باشد. سختی دینامیکی مختلط K_c در فضای فرکانسی می‌تواند با به کاربردن یک بارگذاری حقیقی با دامنه‌ی مشخص P_0 در سرشمع و در نظر گرفتن دامنه‌ی پاسخ مختلط U_c در فرکانس‌های ارتعاشی مختلف سنجیده شود. هنگامی که پاسخ به حالت یکنواخت می‌رسد، ماکزیمم مقدار دامنه‌ی پاسخ U_0 و تأخیر زمانی متناظر با آن t_1 با توجه به دامنه‌ی نیروی به‌کار رفته از نمودار تغییرمکان- تاریخچه‌ی زمانی در سرشمع اندازه‌گیری می‌شوند. با این مشاهدات، تأخیر فاز θ (برحسب رادیان) و سختی دینامیکی مختلط سیستم خاک- شمع به‌صورت زیر می‌تواند به‌دست آید:

$$\theta = \omega t_1 = 2\pi f t_1$$
$$K_c = \left(P_0 / U_0 \right) e^{i\theta} \qquad (13)$$

که درآن f فرکانس ارتعاش به هرتز می‌باشد. با جداسازی سختی دینامیکی داده شده به وسیله‌ی معادله بالا به قسمت‌های حقیقی و مجازی، ثابت فنر (شامل اثر اینرسی) و ثابت میرایی می‌توانند به‌دست آیند.

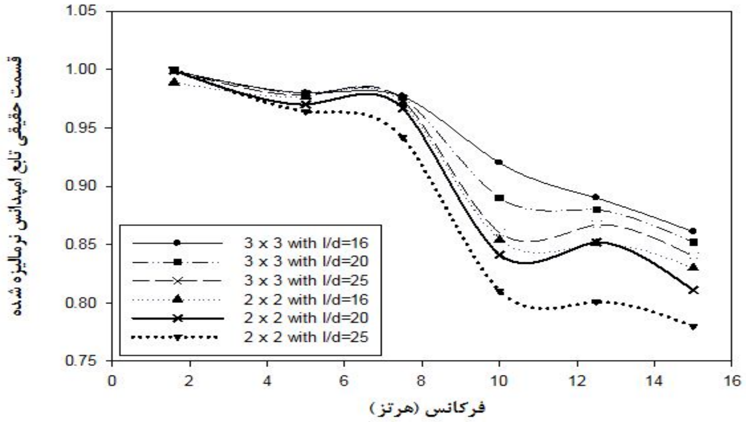
شکل‌های (٦ و ٥) تغییرات قسمت حقیقی تابع امپدانس را با فرکانس ارتعاش در گروه‌های شمع متفاوت به‌ترتیب مربوط به مطالعه‌ی اول و مطالعه‌ی دوم نشان می‌دهند. شکل‌های (٨ و ٧) نیز گویای تغییرات قسمت مجازی این توابع با فرکانس به‌ترتیب ذکر شده می‌باشند. می‌توان ملاحظه نمود که اثر افزایش نسبت طول به قطر و یا فاصله به قطر شمع‌ها به‌صورت کاهش قسمت حقیقی تابع امپدانس می‌باشد.

این مسأله می‌تواند به‌دلیل کاهش سختی در سیستم در اثر افزایش طول شمع‌ها و یا افزایش فاصله‌ی شمع‌ها باشد. کاهش ناگهانی مقدار حقیقی تابع امپدانس در برخی از فرکانس‌های ارتعاشی می‌تواند به‌دلیل افزایش ارتعاش در فرکانس‌های موردنظر به‌دلیل تقارن با فرکانس‌های طبیعی سیستم خاک- شمع باشد.

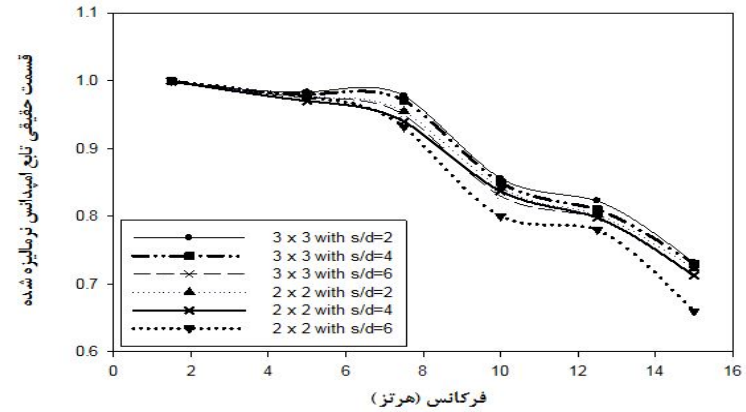
سیستم‌های دارای تعداد شمع بیش‌تر و یا نسبت فاصله به قطر کم‌تر، سختی بیش‌تری را از خود نشان می‌دهند. این مسأله را می‌توان با توجه به مقادیر بالاتر قسمت حقیقی تابع امپدانس مربوط به این سیستم‌ها در نمودارها مشاهده نمود. علاوه براین، مقدار کاهش بیش‌تر سختی در نزدیکی برخی از فرکانس‌ها را می‌توان به ارتعاش بیش‌تر سیستم در آن محدوده‌ها به‌دلیل وجود فرکانس‌های طبیعی متفاوت سیستم در مدهای ارتعاشی مختلف نسبت داد. از آن‌جا که میزان کرنش پلاستیک در مطالعه‌ی حاضر به‌صورت محدود (آستانه‌ی ایجاد کرنش پلاستیک در بارگذاری استاتیکی مربوط به خروجی نرم‌افزار) در نظر گرفته شده است، میرایی ویسکوز می‌تواند نمایانگر میرایی در سیستم باشد.

بخش عمده‌ی میرایی در این حالت مربوط به میرایی تشعشعی است. این‌گونه میرایی در نتیجه‌ی وجود سختی متفاوت دو سیستم در حال ارتعاش در مجاورت یکدیگر می‌باشد. از خصوصیات این میرایی، وابستگی آن به مقدار تماس سطوح در مجاورت یکدیگر است، به‌گونه‌ای که مقدار این میرایی با میزان سطوح در تماس با یکدیگر رابطه‌ی مستقیم دارد. از آن‌جا که در سیستم‌های دارای سختی کم‌تر جدایش بیش‌تری بین شمع و خاک روی می‌دهد، می‌توان انتظار داشت که میزان میرایی در این سیستم‌ها دارای مقدار کم‌تری باشد. اما همان‌گونه که در شکل (٧) می‌توان مشاهده کرد این میزان در سیستم‌های دارای سختی

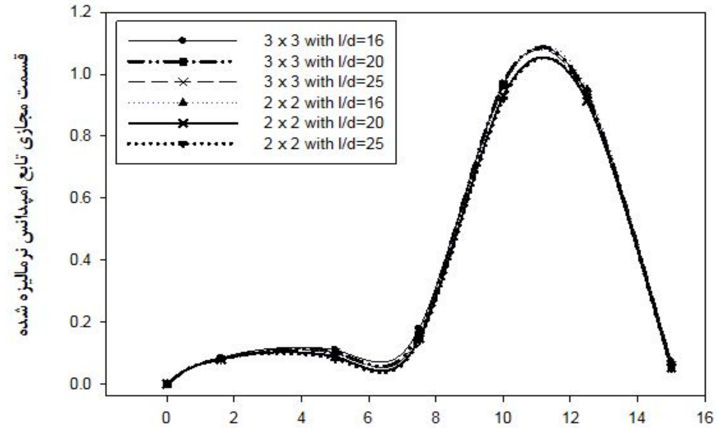
کم‌تر تفاوت زیادی را در مـورد قسـمت مجـازی تـابع امپدانس با سیستم‌های شمع- خـاک سـخت‌تـر نشـان نمی‌دهد.



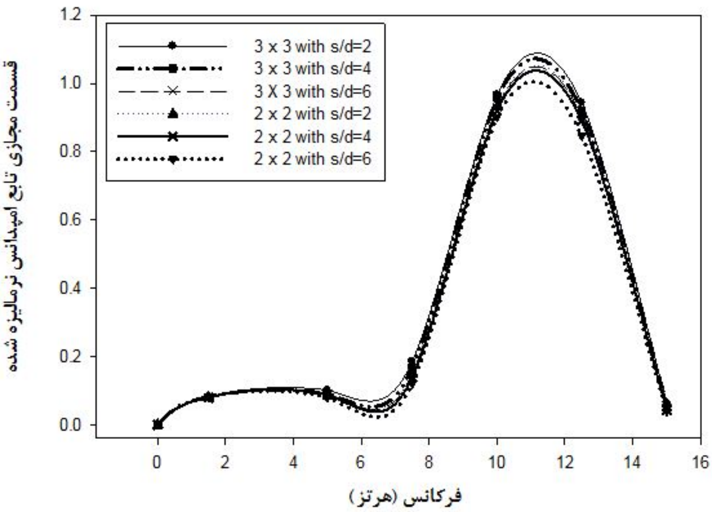
شکل ۵ تغییرات قسمت حقیقی تابع امپدانس برای گروه‌های شمع۲×۲ و۳×۳ با فرکانس ارتعاش با توجه به نسبت‌های طول به قطر متفاوت شمع‌ها



شکل ٦ تغییرات قسمت حقیقی تابع امپدانس برای گروه‌های شمع۲×۲ و۳×۳ با فرکانس ارتعاش و مقایسه مقادیر آن‌ها با توجه به نسبت های فاصله به قطر متفاوت



شکل ۷ تغییرات قسمت مجازی تابع امپدانس برای گروه‌های شمع ۲×۲ و۳×۳ با فرکانس ارتعاش با توجه به نسبت‌های طول به قطر متفاوت شمع‌ها



شکل ۸ تغییرات قسمت مجازی تابع امپدانس برای گروه‌های شمع ۲×۲ و ۳×۳ با فرکانس ارتعاش با توجه به نسبت‌های فاصله به قطر متفاوت

دلیل این مسأله می‌تواند این باشد که در سیستم‌های نرم‌تر، افزایش طول شمع‌ها منجر به ایجاد سطح تماس بیش‌تر با خاک اطراف می‌گردد و بنابراین اگرچه اثر افزایش طول شمع‌ها کاهش سختی در سیستم و در نتیجه کاهش میرایی به‌دلیل افزایش جدایش بین شمع و خاک است، اما افزایش سطح تماس خاک و شمع اثر معکوس بر کاهش میرایی و تفاوت در میزان قسمت مجازی تابع امپدانس در گروه‌های شمع با سختی متفاوت را محدود نموده است. شکل (۸) نیز همانند موارد مربوط به مطالعه‌ی اول به میرایی کم‌تر سیستم‌های دارای سختی پایین‌تر به‌دلیل ارتعاش هماهنگ بیش‌تر همراه با خاک اطراف و نیز اثر جدایش بین شمع و خاک بر مقدار میرایی اشاره دارد. از آن‌جا که در سیستم‌های دارای سختی کم‌تر، هماهنگی حرکت با خاک اطراف بیش‌تر می‌باشد، از میزان میرایی نسبت به سیستم‌های سخت‌تر کاسته می‌گردد. علاوه بر این، به‌دلیل وجود حرکت بیش‌تر در این سیستم‌ها اثر جدایش بین بدنه‌ی شمع و خاک مشهودتر می‌باشد و در نتیجه از میرایی تشعشعی بین بدنه‌ی شمع و خاک کاسته می‌گردد. این در حالی است که سیستم‌های سخت‌تر دارای جدایش کم‌تری با خاک اطراف می‌باشد و بنابراین قسمت بیش‌تری از انرژی موج لرزه‌ای از طریق تماس بین بدنه‌ی شمع و خاک منتقل و میرا می‌گردد.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه اثر پارامترهای نسبت طول شمع‌ها به قطر آن‌ها و اثر نسبت فاصله به قطر شمع‌ها در گروه‌های شمع چهارتایی (۲×۲) و نه تایی (۳×۳) بر اندرکنش خاک- شمع- سازه (اندرکنش‌های سینماتیک و وابسته به اینرسی با مشاهده‌ی تغییرات توابع انتقال و امپدانس) مورد بررسی قرار گرفت. این بررسی در مطالعه‌ی اول برای سه نسبت متفاوت طول به قطر و در مطالعه‌ی دوم برای سه نسبت متفاوت فاصله به قطر در گروه شمع در فضای فرکانسی به‌صورت تحلیل‌های سه‌بعدی با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS انجام گرفت و نتایج زیر به‌دست آمد:

۱- با افزایش نسبت طول به قطر شمع‌ها در گروه‌های شمع متفاوت، مقدار توابع انتقال نیز افزایش پیدا می‌کنند. دلیل این مسأله می‌تواند کاهش سختی سیستم و بنابراین افزایش تغییرمکان قابل مشاهده در سرشمع‌ها باشد. با افزایش نسبت فاصله به

قطرشمع‌ها می‌توان مشاهده نمود که مقدار توابع انتقال نیز متناظر با این تغییر افزایش می‌یابند. این مسأله می‌تواند به کاهش انسجام سیستم گروه شمع در نتیجه افزایش فاصله‌ی بین شمع‌ها و در واقع کاهش راندمان مربوط به عملکرد گروهی آن‌ها نسبت داده شود. به‌عبارت دیگر، سیستم به صورت غیرمنسجم و با مقاومت خمشی کمتر منتج از عمل‌کرد ناهماهنگ شمع‌ها در گروه شمع در برابر بار وارده مقاومت نموده و نسبت تغییرمکان‌های سرشمع به میدان آزاد افزایش می‌یابند. کاهش یکپارچگی مقاومتی سیستم در برابر نیروهای جانبی و تغییرمکان‌های بیش‌تر در سرشمع، افزایش توابع انتقال را به دنبال دارد. این مسأله مانند آن است که سیستم، سختی خمشی کم‌تری را نسبت به حالت گروه شمع مشابه با راندمان بالاتر داراست. علاوه براین می‌توان مشاهده نمود که افزایش تعداد شمع‌ها در گروه باعث کاهش تغییرمکان سرشمع و در نتیجه کاهش توابع انتقال می‌گردد.

۲- افزایش مقدار فرکانس ارتعاش در گروه‌های شمع دارای سختی پایین‌تر منجر به نزدیکی بیش‌تر مقادیر توابع انتقال در این گروه شمع‌ها به توابع انتقال مربوط به گروه‌شمع‌های سخت‌تر می‌گردد. این مسأله می‌تواند به دلیل ارتعاش بالاتر در این فرکانس‌ها و تقارن با فرکانس طبیعی در سیستم‌های سخت باشد.

۳- افزایش نسبت طول به قطر شمع‌ها منجر به کاهش قسمت حقیقی تابع امپدانس گردید که بیانگر کاهش سختی سیستم خاک- شمع است. در بررسی اندرکنش وابسته به اینرسی در مطالعه دوم نیز اثر افزایش نسبت فاصله به قطر شمع‌ها به‌صورت کاهش قسمت حقیقی توابع امپدانس خود را نشان می‌دهد. این مسأله در واقع بدان معنی است که افزایش این نسبت منجر به کاهش سختی سیستم می‌گردد. اثر این کاهش را در فرکانس‌های خاصی که وابسته به مشخصات سیستم مرکب متشکل از خاک وشمع و سازه می‌باشند، بیش‌تر می‌توان دید.

٤- اثر افزایش نسبت طول به قطر شمع‌ها به‌صورت کاهش قسمت مجازی در این‌گونه سیستم‌ها خود را نشان می‌دهد که گویای کاهش میرایی در سیستم است.

این مسأله می‌تواند به افزایش جدایش بین شمع و خاک در گروه‌های شمع دارای نسبت طول به قطر بیشتر و در واقع سختی کم‌تر مربوط باشد که منجر به کاهش میرایی تشعشعی در سیستم می‌گردد. با این‌حال بایستی توجه داشت که با افزایش طول شمع‌ها، سطح تماس خاک و شمع نیز افزایش می‌یابد و بنابراین میرایی تشعشعی در سیستم که وابسته به سطح تماس دو جسم می‌باشد، افزایش می‌یابد. برآیند این دو اثر منجر به تفاوت اندک مقدار مجازی تابع امپدانس در سیستم‌های خاک- شمع متفاوت می‌گردد. با افزایش نسبت فاصله به قطر شمع‌ها قسمت مجازی توابع امپدانس نسبت به مقادیر مربوط به حالت‌های دارای فواصل کم‌تر شمع‌ها دچار کاهش می‌شوند. این مسأله نیز همانند مطالعه اول به دلیل اثر این تغییر بر سختی سیستم (کاهش آن) می‌باشد که منجر به تغییرمکان‌های بیش‌تر گروه شمع به خصوص در سرشمع می‌گردد. متعاقب آن، جدایش بیش‌تر بین شمع و خاک در سیستم‌های نرم‌تر و در واقع تماس کم‌تر بدنه شمع و خاک منجر به کاهش میرایی تشعشعی در سیستم می‌گردد که به صورت کاهش قسمت مجازی تابع امپدانس خود را نشان می‌دهد.

مراجع

1. Balendra, S., "Numerical Modeling of Dynamic Soil-Pile-Structure Interaction", M.Sc. Thesis, Washington State University, (2005).

2. Goodson, M. W. and Anderson, J. B., "Soil-Structure Interaction-a Case Study", *Proceedings of the 2005 Structures Congress and the 2005 Forensic Engineering Symposium*, New York, (2005)

3. Nogami, T. and Konagai, K., "Time domain axial response of dynamically loaded single piles", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 112 (11), pp. 1241-1252, (1986).

4. Nogami, T. and Konagai, K., "Time domain flexural response of dynamically loaded single piles", *Journal of Engineering Mechanics,* ASCE, 114 (9), pp. 1512-1525, (1988).

5. El Naggar, M. H. and Novak, M., "Nonlinear lateral interaction in pile dynamics", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 14, pp. 141-157, (1995).

6. El Naggar, M. H. and Novak, M., "Nonlinear analysis for dynamic lateral pile response", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 15, pp. 233-244, (1996).

7. Wu, G. and Finn, W. D. L., "Dynamic nonlinear analysis of pile foundations using finite element method in the time domain", *Canadian Geotechnical Journal*, 34, pp. 44-52, (1997).

8. Bentley, K. J. and El Naggar, M. H., "Numerical analysis of kinematic response of single piles", *Canadian Geotechnical Journal*, 37, pp. 1368-1382, (2000).

9. Penzien, J., *"Soil-Pile Foundation Interaction"*, Earthquake Engineering, Chapter 14, Prentice- Hall, pp. 349-381, (1970).

10. Cai, Y. X., Gould, P. L. and Desai, C. S., "Nonlinear analysis of 3D seismic interaction of soil-pile-structure system and application", *Engineering Structures*, 22 (2), pp. 191-199, (2000).

11. Maheshwari, B. K., Truman, K. Z., Gould, P. L. and El-Naggar, M. H., "Three dimensional nonlinear dynamic behavior of pile groups using finite element method in the time domain", *Canadian Geotechnical Journal*, 41, pp. 118-133, (2003).

12. Poulos, H. G., "Analysis of the Settlement of Pile groups", *Géotechnique*, 18 (4), pp. 449-471, (1968).

13. Poulos, H. G., "Behavior of Laterally Loaded piles, II: Pile Groups", *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, ASCE, 97 (SM5), pp. 773-751, (1971).

14. Butterfield, R. and Banerjee, P. K., "The Elastic Analysis of Compressible Piles and Pile Groups", *Géotechnique*, 21, pp. 43-60, (1971).

15. Kausel, E. and Peek, R., "Boundary integral method for Stratified Soils", Res. Re, R82-50, MIT, Cambridge, MA, (1982).

16. Kaynia, A. M. and Kausel, E., "Dynamic behavior of pile groups", *Proc. of the 2nd int. conference on numerical methods in offshore piling*, Texas University, Austin, pp. 509-532, (1982).

17. Sen, R., Davies, T. G. and Banerjee, P. K., "Dynamic Analysis of Piles and Pile Groups Embedded in Homogeneous Soils", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 13, pp. 53-65, (1985).
18. Ahmad, S. and Mamoon, S. M., "Seismic Response of Floating Piles to Obliquely Incident Waves", *Proc. of the 2nd int. conference on recent advances in geotechnical earthquake engineering and soil dynamics*, St. Louis, MO., University of Missouri-Rolla Publication, pp. 805-814, (1991).
19. Novak, M. and Mitwally, H., "Transmitting boundary for axisymmetrical dilation problems", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 114 (1), pp. 181-187, (1988).